

УДК 630*52

В.А. Усольцев

Уральский государственный лесотехнический университет,
Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ЛЕСОВ: ПО ГЕОГРАФИЧЕСКИМ КООРДИНАТАМ ИЛИ КЛИМАТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ?

Введение

Для аналитического описания географических закономерностей распределения продуктивности фитомассы лесного покрова необходимо определиться с выбором географических характеристик территории Евразии, которые можно было бы выразить числом и мерой. Обобщив обширные материалы, В.Л. Комаров (1921) разработал учение о меридиональной зональности флор и растительного покрова, которая дополняет широтную зональность и должна учитываться при выделении биогеографических областей. В.Л. Комаров различает на крупных континентах два типа флор: приокеанские, вытянутые узкой полосой вдоль побережий, и континентальные, развивающиеся в отдалении от первых. Пересекаясь с известными семью широтными поясами, они дают на пространствах Старого и Нового Света 42 флористических округа, каждый со своим климатом, почвой, своим эндемизмом растений и преобладающим типом растительного покрова (Кабанов Н.Е. Отечественные физико-географы: http://big-archive.ru/geography/domestic_physical_geographers/103.php). Сегодня известно, что основные изменения растительного покрова происходят не только в широтном направлении вследствие изменения интенсивности солнечной радиации, но и в меридиональном (от морских побережий внутрь континента) в результате изменения континентальности климата и условий увлажнения (Волобуев, 1947; Курнаев, 1973; Назимова, 1995).

В последние годы установлены глобальные закономерности увеличения ЧПП лесного покрова с ростом осадков и средней годичной температуры, но попарно, т.е. без учета совместного действия двух факторов (Luuyssaert et al., 2007). При исследовании географических закономерностей распределения фитомассы и ЧПП лиственных деревьев Северной Евразии (Усольцев, 2001; Usoltsev et al., 2002) по материалам 390 пробных площадей была установлена статистически значимая обратная связь общей и надземной фитомассы и ЧПП с индексом континентальности (Борисов, 1967) в интервале от 35 до 95%. Обратная связь фитомассы 30-летних лиственных деревьев с географической широтой (47, 50, 52 и 62°), что соответствовало южной, средней, северной частям Большого Хингана и центральной Сибири) была показана в совместной работе китайских и японских ис-

следователей (Shi et al., 2010), согласно которой в диапазоне широт от 47 до 62° фитомасса снижается в 3-4 раза.

Статистически значимая 2-факторная отрицательная связь общей и надземной фитомассы и ЧПП с индексом континентальности, по В. Ценкеру (Борисов, 1967), в интервале от 20 до 99% и положительная - со средне-месячной суммой эффективных температур выше +5°С в интервале от 20 до 80°, по С. Тукканену (Tuhkanen, 1984), была установлена для ельников, березняков, естественных сосняков (рис. 1) и культур сосны Северной Евразии (Усольцев, 2007; Усольцев и др., 2010).

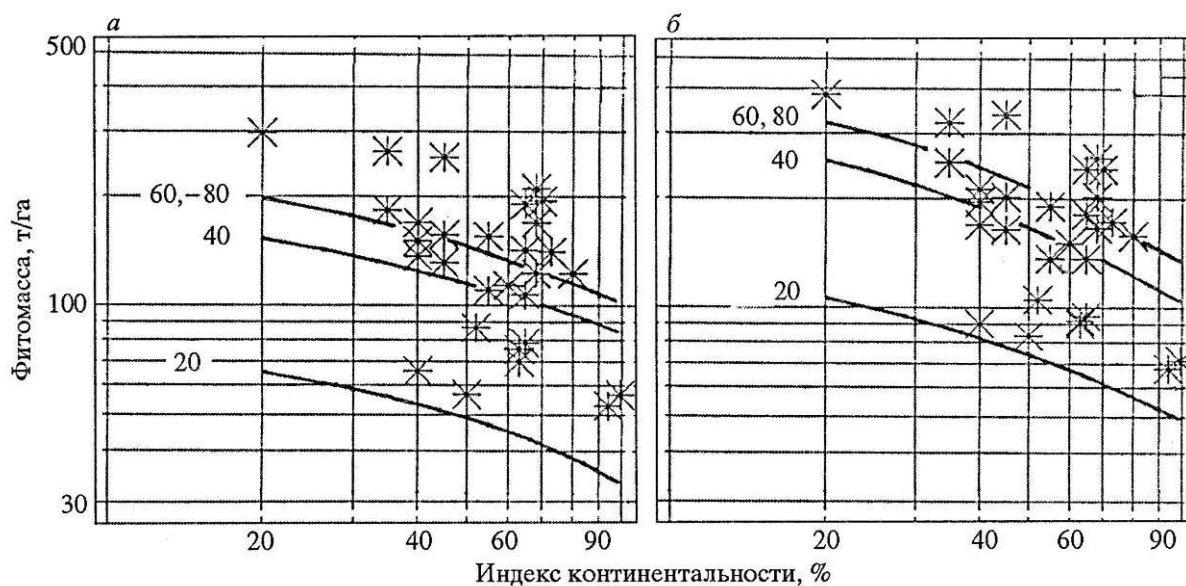


Рис. 1. Связь расчетных показателей надземной (а) и общей (б) абсолютно сухой фитомассы естественных сосняков в возрасте 100 лет с индексом континентальности климата, по В. Ценкеру, и суммой эффективных температур (°С), обозначенной цифрами (Усольцев, 2007)

Необходимо отметить, что линии изотерм, как и границы природных зон, коррелируют с линиями широтной градуировки земной поверхности, хотя и с некоторыми отклонениями, вызванными высотной зональностью горных территорий. Поэтому широтный градиент фитомассы и ЧПП лесного покрова может быть описан количественно как в связи с суммой эффективных температур или с порядковым номером природной зоны в направлении с севера на юг или с юга на север, так и непосредственно с географической широтой. В последнем случае ЧПП лесного покрова в направлении от тропиков к обоим полюсам снижается синхронно (рис. 2).

Более сложная ситуация – с меридиональным градиентом биопродуктивности лесов. Известно, что формирование климата в значительной мере связано с характером и интенсивностью теплового взаимодействия материков и океанов и соответствующей трансформацией воздушных масс над поверхностями моря и суши с их различным термическим режимом. Эти отличия обуславливают взаимодействие воздушных потоков, вследствие чего формируются климаты с разной степенью континентальности,

переходные между морским и континентальным (Полозова, 1954). Предложено более 20 способов количественной оценки степени континентальности климата (Knoch, Schulze, 1952). Формулы для расчета континентальности климата различаются главным образом различными вкладами и соотношениями основных двух составляющих: амплитуды температур самого теплого и самого холодного месяцев и географической широты.

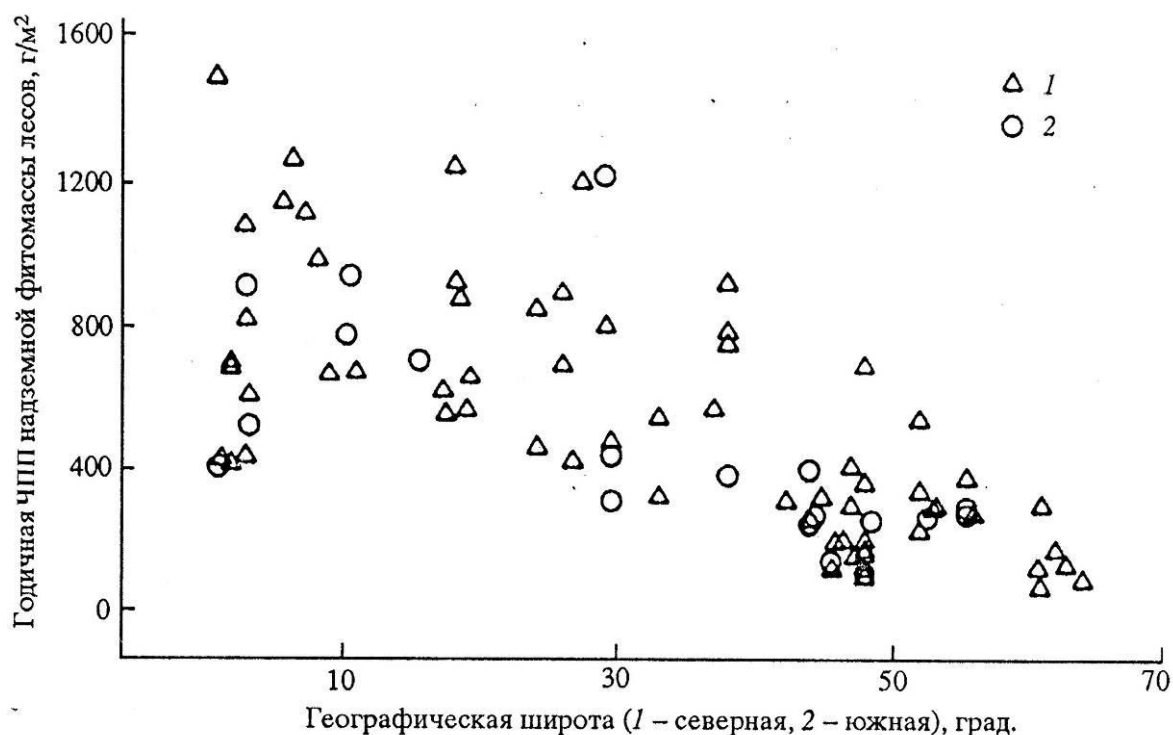


Рис. 2. Распределение годичной ЧПП надземной фитомассы лесов (г/м²) от тропиков к полюсам (Anderson et al., 2006).

Поскольку и суммы эффективных температур, и индексы континентальности климата, в какой-то степени коррелируют соответственно с широтной и долготной градуировкой земной поверхности, в настоящей статье предпринята попытка на примере елово-пихтовых насаждений Евразии выяснить, насколько приемлемо при моделировании территориального распределения ЧПП лесов использование не только зонально-климатических факторов, но и непосредственной привязки объектов исследования (пробных площадей, на которых определена ЧПП) к координатной сетке - широте и долготе земной поверхности. При этом широтный (термический) градиент представлен картой-схемой природной зональности Евразии (см. **рис. 4**).

Выбор градиента природной зональности вместо изотерм обусловлен тем, что карта-схема изотерм эффективных температур С. Тукканена (Tuhkanen, 1984) охватывает лишь территорию Северной Евразии к северу от 45⁰ северной широты (**рис. 3**) и не распространяется на всю Евразию, в частности, на территорию Китая и Японии, а имеющиеся соответствующие схемы изотерм для этих стран не совместимы со схемой С. Тукканена для

Северной Евразии. Нет также доступной для использования карты-схемы изотерм для всей Евразии. По этой же причине схема изоконт А.А. Борисова (1967) для Северной Евразии заменена схемой С.П. Хромова (1957), охватывающей всю Евразию.

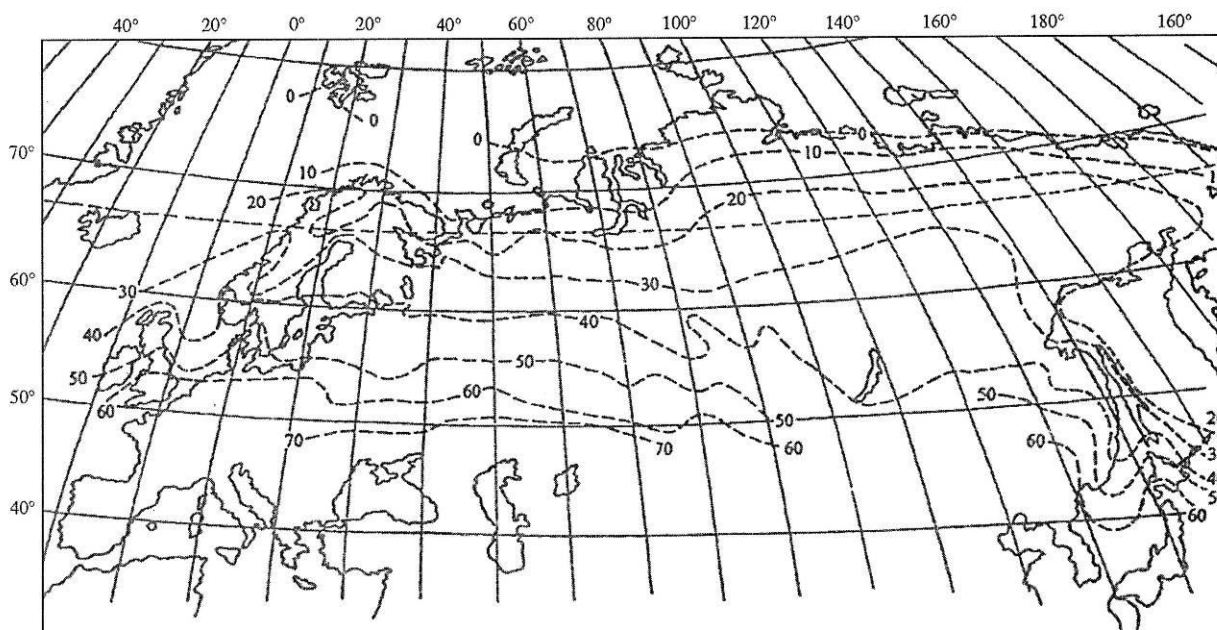


Рис. 3. Карта-схема распределения среднемесячных значений суммы эффективных температур выше $+5^{\circ}\text{C}$ (показаны цифрами) за вегетационный период в Северной Евразии (Tuhkanen, 1984)

Объекты и методы исследования

По многочисленным литературным источникам была создана база данных о фитомассе и ЧПП лесных насаждений основных лесобразующих пород Евразии в количестве около 8 тыс. определений (Усольцев, 2010). В настоящем исследовании на ее основе сформирована база данных о фитомассе и ЧПП для елово-пихтовых насаждений, произрастающих на территории Евразии.

Упомянутые данные по фракциям (ствол, ветви, хвоя, корни, нижний ярус) позаимствованы из 84 литературных источников и получены на 479 пробных площадях, в том числе: 120 – для ели европейской (Франция, Бельгия, Дания, Германия, Италия, Румыния, Чехия, Болгария, Норвегия, Швеция, Финляндия, Эстония, Литва, Белоруссия, Украина, Россия), 75 – ели сибирской (Россия), 5 – ели аянской (Япония), 17 – ели Шренка (Китай), 161 – смешанных насаждений ели Вильсона и пихты Георга (Китай), 4 – ели шероховатой (Китай), 97 – пихты китайской (Китай). Данные о продукции сопровождаются таксационной характеристикой древостоев пробных площадей.

Известно, что в пределах бореальной зоны ель и пихта часто растут совместно с преобладанием той или другой породы. Специальным сравнительным исследованием ельников с примесью пихты и пихтарников с при-

месью ели в условиях Урала не выявлено статистически значимого различия биологической продуктивности тех и других в возрастном диапазоне от 20 до 130 лет (Усольцев и др., 2012). Поэтому материалы по ели и пихте как породам, близким по морфоструктуре и часто произрастающим в смешанном составе, на данном этапе объединены в один исходный массив, структурированный в географическом плане.

Ранее (Usol'tsev, 2007) были проанализированы методические неопределенности, связанные с оценкой биологической продукции лесных насаждений и с формированием соответствующей базы данных, которые снижают надежность результатов при ее использовании. Тем не менее, для елово-пихтовых лесов Евразии нами собрана наиболее представленная на сегодня база данных ЧПП, объем которой позволяет получить на основе применения математико-статистических методов статистически значимые результаты по биопродуктивности лесных экосистем и ее географии.

С целью выявления географических закономерностей в изменении биопродуктивности лесов на территории Евразии положение пробных площадей, на которых было выполнено определение ЧПП и фитомассы, нанесено нами на карту-схему климатических поясов Евразии (рис. 4) и на карту-схему изоконт (рис. 5), рассчитанных по С.П. Хромову (1957), а также соотнесено с сеткой географических координат.

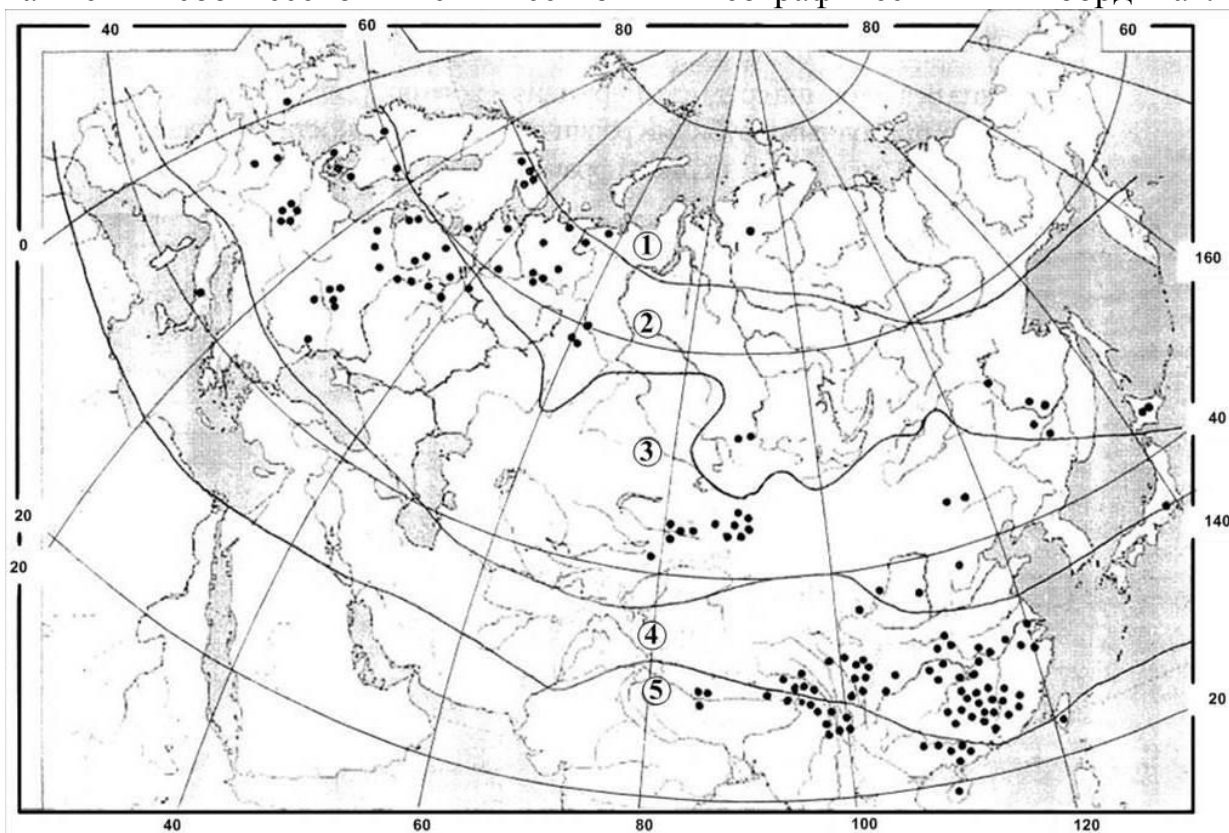


Рис. 4. Распределение пробных площадей по климатическим поясам:
1 – субарктический, 2 – северный умеренный, 3 – южный умеренный, 4 – субтропический, 5 – субэкваториальный (http://russlov.com/geograficheskiy_atlas/page/klimaticheskie_poyasa_i_oblasti.104/)

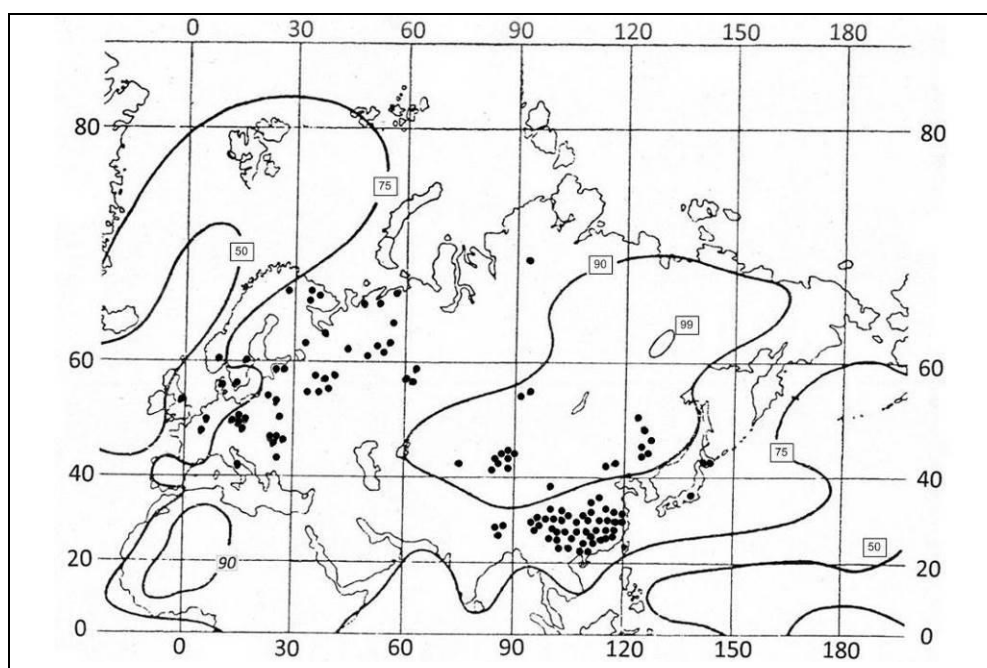


Рис. 5. Распределение пробных площадей на карте-схеме изоконт Евразии (Хромов, 1957); индексы континентальности показаны цифрами, в процентах

Результаты и обсуждение

В процессе структурирования базы данных о ЧПП и фитомассе елово-пихтовых насаждений каждая пробная площадь географически позиционирована: пробные площади каждого климатического пояса (от 1-го до 5-го на рис. 1) соотнесены с индексами континентальности (от 55 до 95%, по С.П. Хромову; см. **рис. 5**), и выполнен многофакторный регрессионный анализ географической ординации ЧПП согласно рекурсивной системе уравнений:

$$\begin{aligned} \ln(M) &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln A)^2 + a_3 \ln(Zon) + a_4(\ln Zon)^2 + a_5 \ln(IC) \rightarrow \\ \rightarrow \ln(Z_i/M) &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln A)^2 + a_3 \ln(Zon) + a_4(\ln Zon)^2 + a_5 \ln(IC) \end{aligned} \quad (1)$$

где M – запас древостоя, $\text{м}^3/\text{га}$; Z_i – годовичная ЧПП i -й фракции фитомассы (стволы, хвоя, ветви, корни, надземная и полная – соответственно Z_S , Z_F , Z_B , Z_R , Z_A и Z_T), $\text{т}/\text{га}$; A – возраст древостоя, лет; Zon – номер климатического пояса (от 1 до 5); IC – индекс континентальности, %. Характеристика уравнений (1) дана в **табл. 1**. Все константы в (1) и далее значимы на уровне P_{95} и выше.

Последовательным табулированием уравнений в рекурсивной системе (1) по задаваемым значениям возраста древостоев, номера климатического пояса и индекса континентальности получена таблица возрастного изменения ЧПП по фракциям фитомассы. Из таблицы взяты значения ЧПП

для возраста 100 лет и построены для некоторых фракций 3-мерные диаграммы (рис. 6).

Таблица 1

Характеристика уравнений (1) для елово-пихтовых насаждений Евразии

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные						R^2	SE
	a_0	$a_1(\ln A)$	$a_2(\ln A)^2$	$a_3 \ln(Zon)$	$a_4(\ln Zon)^2$	$a_5 \ln(IC)$		
$\ln(M)$	0,8898	2,4643	-0,2302	3,4121	-1,1100	-0,8558	0,547	0,49
$\ln(Z_S/M)$	-5,7957	-0,9785	-	-0,2394	0,0515	1,2751	0,854	0,32
$\ln(Z_F/M)$	-11,099	-0,9652	-	-1,0547	0,0641	2,6346	0,756	0,44
$\ln(Z_B/M)$	16,375	-1,1311	-	0,3782	-0,7778	-3,8285	0,764	0,58
$\ln(Z_R/M)$	10,946	-1,0016	-	-2,8663	0,7987	-2,2703	0,796	0,47
$\ln(Z_A/M)$	-1,4659	-0,8758	-	-2,3253	0,8423	0,6988	0,806	0,33
$\ln(Z_T/M)$	0,2437	-0,8889	-	-2,4375	0,7382	0,4377	0,831	0,35

Согласно полученным диаграммам (см. рис. 6), ЧПП хвои возрастает от первого климатического пояса к третьему, а затем в направлении к пятому поясу снижается. ЧПП стволов, а также надземная и полная ЧПП, последовательно возрастают на всем интервале климатических поясов, выходя на плато в 4 и 5 поясе. По мере приближения к полюсу континентальности ЧПП хвои возрастает, а ЧПП надземной и общей фитомассы – снижается. Необходимо отметить, что изменение ЧПП по градиенту континентальности не выражено столь же четко, как это было выявлено для лиственничников (Usoltsev et al., 2002), поскольку полюс континентальности находится в стороне от территории, охваченной заложенными пробными площадями в елово-пихтарниках (см. рис. 5).

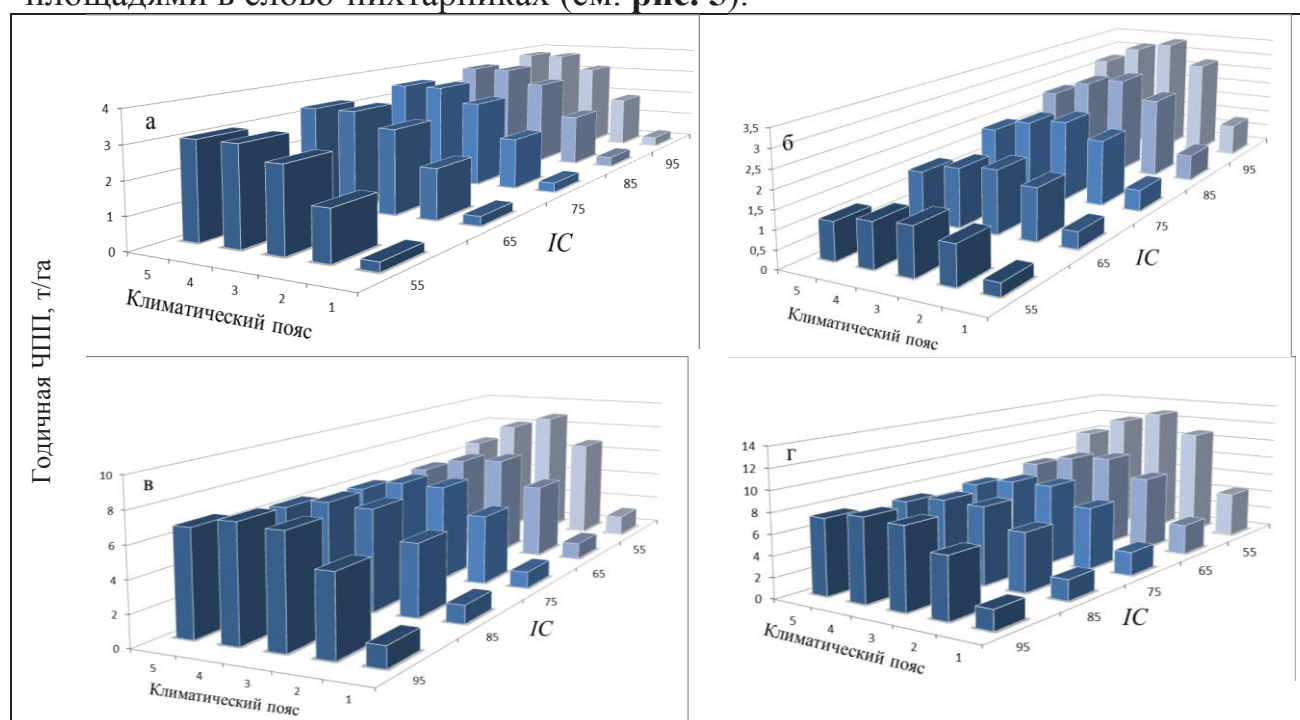


Рис. 6. Изменение годичной ЧПП (а) стволов, (б) хвои, (в) надземной и (г) общей фитомассы елово-пихтарников по зональным (климатическим) поясам и в связи с индексом континентальности, по С.П. Хромову

Во втором варианте для каждой пробной площади установлены географические широта (N) и долгота (E), в градусах, и регрессионный анализ исходных материалов базы данных выполнен согласно уравнениям:

$$\ln(M) = a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln A)^2 + a_3 \ln(N) + a_4(\ln N)^2 + a_5 \ln(E) + a_6(\ln E)^2 + a_7(\ln E)(\ln N) \rightarrow \\ \rightarrow \ln(Z_i/M) = a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln A)^2 + a_3 \ln(N) + a_4(\ln N)^2 + a_5 \ln(E) + a_6(\ln E)^2 + a_7(\ln E)(\ln N), (2)$$

где N – географическая широта, град.; E – географическая долгота, град. Характеристика уравнений (2) приведена в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика уравнений (2) для елово-пихтовых насаждений Евразии

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные								R^2	SE
	a_0	a_1 ($\ln A$)	a_2 ($\ln A$) ²	a_3 $\ln(N)$	a_4 ($\ln N$) ²	a_5 $\ln(E)$	a_6 ($\ln E$) ²	a_7 ($\ln E$)($\ln N$)		
$\ln(M)$	10,165	2,0321	-0,1789	-	-0,5789	-2,9837	-	0,6966	0,626	0,36
$\ln(Z_S/M)$	3,1495	-0,1509	-0,1062	-	-0,3502	-2,3843	-	0,6381	0,876	0,29
$\ln(Z_F/M)$	-6,3805	-3,5050	0,3056	4,2687	-0,5513	-	-0,0869	0,2792	0,817	0,37
$\ln(Z_B/M)$	-5,0676	-1,2590	-	-	0,5128	-	0,2414	-0,4591	0,794	0,53
$\ln(Z_R/M)$	57,037	-3,5114	0,3004	-16,515	1,2135	-11,695	0,4723	2,0640	0,843	0,41
$\ln(Z_A/M)$	0,9353	-2,5415	0,2012	-	0,1719	-	0,0669	-0,0651	0,855	0,29
$\ln(Z_T/M)$	40,842	-1,9945	0,1298	-14,849	1,3150	-5,8839	0,0714	1,4365	0,885	0,29

Последовательным табулированием уравнений в рекурсивной системе (2) по задаваемым значениям возраста древостоев и их географических координат получена таблица, из которой взяты значения ЧПП для возраста древостоев 100 лет и построены для некоторых фракций 3-мерные диаграммы (рис. 7). При анализе полученных диаграмм обнаруживается, что в широтном градиенте в направлении с юга на север происходит увеличение ЧПП всех фракций фитомассы до 30-40-го градуса северной широты с последующим снижением к 70-му градусу.

Очевидны некоторые различия в изменении ЧПП фракций по широтному градиенту по сравнению с предыдущим вариантом, в частности, снижение ЧПП всех фракций в северном направлении на долготе 30° по мере продвижения на восток сменяется их увеличением на долготе 140° (см. рис. 7). В какой-то мере это можно объяснить тем, что в первом случае «облако» фактических данных ЧПП ориентировано не в направлении «запад-восток», а в направлении «северо-запад - юго-восток», совпадая с градиентом индекса континентальности (см. рис. 5), что и явилось причиной статистически значимого ее изменения в направлении от океанических побережий к центральным районам материка.

Во втором случае максимумы и минимумы профилей ЧПП смещаются также не строго вдоль географических широт, а под углом к ним, и регрессионным анализом подобные нюансы не описываются. Повидимому, по этой же причине отрицательная связь ЧПП с долготой на

широте 20-30° сменяется на положительную на широте 70°, при этом ожидаемого минимума в центральной части материка не наблюдается.

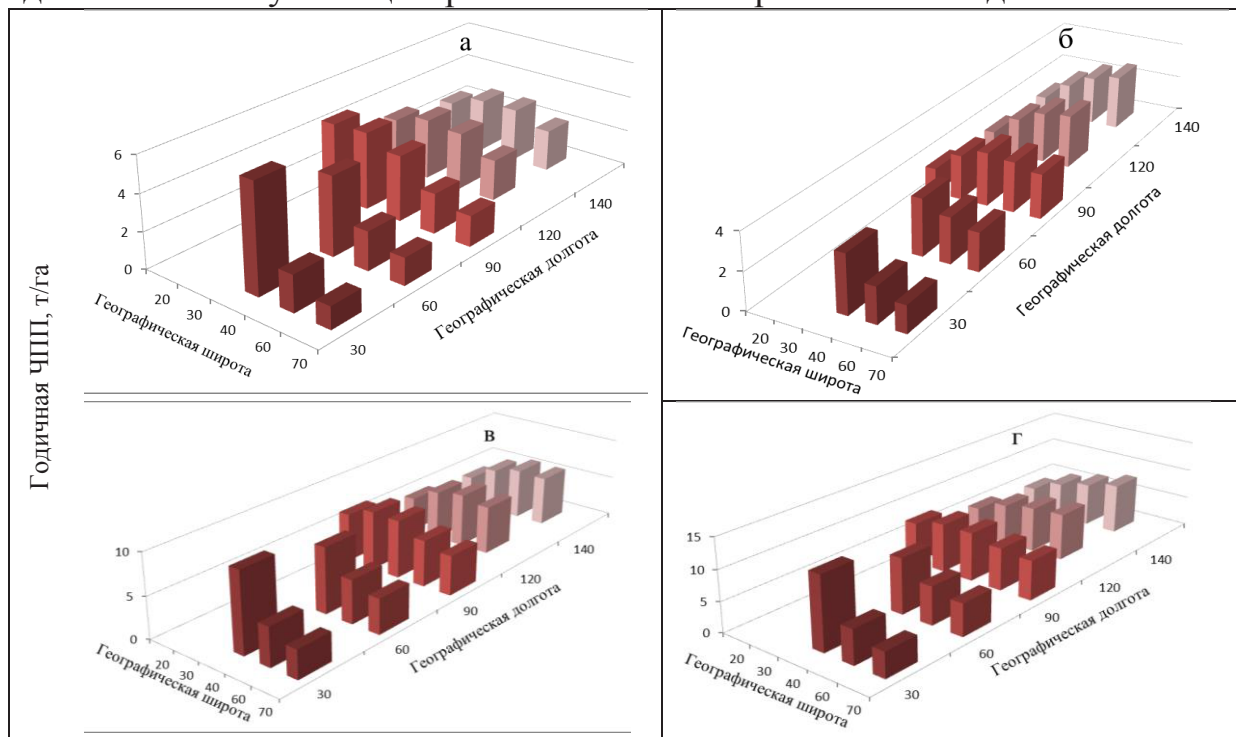


Рис. 7. Изменение годичной ЧПП (а) стволов, (б) хвои, (в) надземной и (г) общей фитомассы елово-пихтарников по географическим координатам

Заключение

Таким образом, ординация показателей ЧПП по сетке географических координат дает при моделировании географического распределения названных показателей на территории Евразии неприемлемые результаты, несмотря на статистически приемлемый уровень значимости расчетных регрессионных моделей, во втором случае даже более высокий по сравнению с первым (ср. коэффициенты детерминации в табл. 1 и 2). Очертания океанических побережий не ориентированы строго по географическим координатам, а именно в направлении от побережий вглубь континента изменяется континентальность климата, с которой показатели ЧПП однозначно связаны на статистически значимом уровне, и эта связь имеет вполне приемлемое эколого-географическое объяснение. Игнорирование высотной поясности горных массивов, занимающих значительную территорию материка (рис. 8), по-видимому, является одной из причин 20-30%-ного остаточного информационного «шума» в полученных моделях. Возможно, его удастся снизить при включении в регрессионную модель таких климатических факторов, как среднегодовой уровень осадков, средняя температура, эвапотранспирация и др.

Список использованной литературы

Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Просвещение, 1967. 296 с.



Рис. 8. Физическая карта Евразии (<http://area7.ru/material.php?1839>)

Волобуев В.Р. О фитоклиматических закономерностях в распределении растительности на территории СССР // Ботан. журнал СССР. 1947. № 5. С. 200-205.

Комаров В.Л. Меридиональная зональность организмов // Дневник I всероссийского съезда русских ботаников в Петрограде. Вып. 3. Петроград, 1921. С. 27-28.

Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.

Назимова Д.И. Климатическая ординация лесных экосистем как основа их классификации // Лесоведение. 1995. № 4. С. 63-73.

Полозова Л.Г. О характеристике континентальности климата // Изв. ВГО. 1954. Т. 86. № 5. С. 412-422.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 708 с.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.

Усольцев В.А., Норицина Ю.В., Борников А.В. Первичная продукция березовых насаждений Северной Евразии с элементами географического анализа // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. Вып. 26. С. 58-62.

Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 365 с.

Хромов С.П. К вопросу о континентальности климата // Известия Всесоюзного географического общества. 1957. № 3. С. 221-225.

Anderson K.J., Allen A.P., Gillooly J.F., Brown J.H. Temperature-dependence of biomass accumulation rates during secondary succession // Ecology Letters. 2006. Vol. 9. P. 673-682.

Knoch K., Schulze A. Methoden der Klimaklassifikation // Ergänzungsheft Nr. 249 zu "Petermanns Geographischen Mitteilungen". Gotha: Justus Perthes Verlag, 1952. 87 S.

Luyssaert S., Inglima I., Jung M., Richardson A.D. et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database // Global Change Biology. 2007. Vol. 13. P. 2509-2537 (doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x).

Shi F., Sasa K., Koike T. Characteristics of larch forests in Daxingan mountains, Northeast China // A. Osawa et al. (eds.). Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. P. 367-383 (Ecological Studies. Vol. 209) (DOI: 10.1007/978-1-4020-9693-8).

Tuhkanen S. A circumboreal system of climatic-phytogeographical regions // Acta Bot. Fennica. 1984. Vol. 127. P. 1-50.

Usoltsev V.A. Some methodological and conceptual uncertainties in estimating the income component of the forest carbon cycle // Russian Journal of Ecology. 2007. Vol. 38. No. 1. P. 1-10.

Usoltsev V. A., Koltunova A.I., Kajimoto T., Osawa A., Koike T. Geographical gradients of annual biomass production from larch forests in Northern Eurasia // Eurasian Journal of Forest Research. 2002. Vol. 5. P. 55-62.

Рецензент статьи: доктор сельскохозяйственных наук, профессор, проректор по научной работе Уральского государственного лесотехнического университета С.В. Залесов